

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.014

引用格式:陈娟,常军,王礼麒. SAR 成像系统重频抖动的影响及补偿[J]. 电讯技术,2015,55(7):787-791. [CHEN Juan, CHANG Jun, WANG Liqi. PRF Jitter Effect on and Error Compensation for SAR Imaging System[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(7):787-791.]

SAR 成像系统重频抖动的影响及补偿*

陈娟**, 常军, 王礼麒

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要:合成孔径雷达(SAR)系统要求时间严格同步,从而可利用脉冲间的相干性进行方位处理。推导了重频抖动造成的时间同步误差对 SAR 成像方位聚焦的影响以及其极限值,并给出了补偿方法。采用实际系统参数进行了仿真验证,并分析了存在重频抖动误差的实际 SAR 成像雷达系统,实测数据处理和补偿结果验证了理论的有效性。所提方法对实际雷达系统的设计、问题分析和 SAR 成像处理误差补偿有指导意义,具有较高的实用价值。

关键词:合成孔径雷达;成像系统;脉冲重复频率;时间同步误差;重频抖动

中图分类号:TN958.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)07-0787-05

PRF Jitter Effect on and Error Compensation for SAR Imaging System

CHEN Juan, CHANG Jun, WANG Liqi

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Synthetic aperture radar(SAR) is a strict synchronization system which gets the azimuth gain by the coherence of pulses. This paper analyzes the effect of the time synchronization error by SAR radar system pulse repetition frequency (PRF) jitter and its limit and proposes an error compensation algorithm. The simulation and experimental results show the efficiency of the method. The simulation results, processing and error compensation results of experimental data are provided to prove the effectiveness and practicability of the proposed algorithm. The method is useful for system design, problem diagnosis and error compensation of practical SAR systems.

Key words: synthetic aperture radar; imaging system; pulse repetition frequency; time synchronization error; PRF jitter

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统由于采用数据二维的相位信息进行处理,因此对系统的相干性要求非常高^[1]。然而,在实际系统中由于设计原因或者条件的限制,使得脉冲间的相干性受到影响,主要包括频率源、调频源产生的频率或相位不稳定^[2](如漂移、随机)、平台的无规则运动^[3](运动误差)、系统内各部分工作的相对时间关

系不稳定^[4-8](时钟抖动、双站 SAR、收发分置)等方面。

文献[5]分析了线性和随机时间同步误差对双站 SAR 造成的不同影响;文献[6]采用理论分析与数字仿真试验相结合的方式分析了时间同步误差对 SAR 系统的影响,得到当时时间同步误差为纳秒级时,其对 SAR 成像的影响可以忽略,然而并未分析当存在周期性误差时会出现的情况。

* 收稿日期:2015-03-11;修回日期:2015-06-02 Received date:2015-03-11;Revised date:2015-06-02
** 通讯作者:chj_1030@163.com Corresponding author:chj_1030@163.com

本文分析了当脉冲重复频率在成像过程中存在抖动,即使时间同步误差量级为纳秒级时,对 SAR 成像图像聚焦的影响,给出了对于存在重频抖动时 SAR 成像补偿方式;针对实际系统具体现象进行了分析和补偿处理,实测数据验证了分析的有效性。

2 重频抖动对 SAR 成像的影响

2.1 重频抖动对 SAR 成像的影响原理分析

雷达发射线性调频信号,表达式为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c t) \exp(j\pi K_r t^2)。 \quad (1)$$

式中,第一项为发射脉冲窗函数,第二项为载波,第三项为 chirp 调制, t 为快时间, T_p 为脉冲宽度, f_c 为载波频率, K_r 为 chirp 信号调频率。

重频抖动造成的发射信号延时用 $\delta(\eta)$ 表示, η 为慢时间,也称为方位向。当存在该延时,发射信号为

$$s(t, \eta) = \text{rect}\left(\frac{t - \delta(\eta)}{T_p}\right) \exp\{j2\pi f_c [t - \delta(\eta)]\} \exp\{j\pi K_r [t - \delta(\eta)]^2\}。 \quad (2)$$

对于存在延迟的发射信号,考虑单点目标的回波数据,经过距离脉压和距离徙动校正后,表达式为

$$s_r(t, \eta) = \text{sinc}\left\{B\left[t - \delta(\eta) - \frac{2R_0}{c}\right]\right\} \exp\left[-j\frac{4\pi f_c R(\eta)}{c}\right] \exp[-j2\pi f_c \delta(\eta)]。 \quad (3)$$

式中, B 为发射脉宽带宽; R_0 为目标的最短斜距; $R(\eta) = R_0 - \eta V \cos\theta + \eta^2 V^2 \sin^2\theta / (2R_0)$ 为雷达与目标间的斜距, V 为雷达平台速度, θ 为雷达速度与天线波束间夹角,即前斜角。

进行方位解斜处理,时域参考函数为

$$h(\eta) = \exp[j2\pi f_{dc} \eta + j\pi \gamma_a \eta^2]。 \quad (4)$$

式中, $f_{dc} = 2V \cos\theta / \lambda$ 为方位向中心频率, $\gamma_a = -2V^2 \sin^2\theta / (\lambda R_0)$ 为方位向调频斜率。

时域乘参考函数的共轭

$$s_{r2}(t, \eta) = s_r(t, \eta) \cdot h^*(\eta) = \text{sinc}\left\{B\left[t - \delta(\eta) - \frac{2R_0}{c}\right]\right\} \exp[-j2\pi f_c \delta(\eta)] \exp[-j2\pi \gamma_a \Delta\eta \cdot \eta] \exp\left[-j\frac{4\pi R_0}{\lambda} - j2\pi f_{dc} \Delta\eta + j\pi \gamma_a \Delta\eta^2\right]。 \quad (5)$$

式中, $\Delta\eta = \eta - \eta_0$ 为波束中心照射经过点目标的时刻与波束中心经过参考点的时刻之差。

式(5)中最后一项与时间无关,为一固定相位项,第一项和第二项与系统重频抖动造成的延时相关,第三项为解斜后的线性相位项。令

$$\begin{cases} g_1(t, \eta) = \text{sinc}\{B[t - \delta(\eta) - 2R_0/c]\} \\ g_2(\eta) = \exp[-j2\pi f_c \delta(\eta)] \\ s_3(\eta) = \exp[-j2\pi \gamma_a \Delta\eta \cdot \eta] \end{cases}, \quad (6)$$

其方位向频谱分别为

$$\begin{cases} G_1(t, f_\eta) = \text{FFT}[g_1(t, \eta)] \\ G_2(f_\eta) = \text{FFT}[g_2(\eta)] \\ S_3(f_\eta) = \text{FFT}[s_3(\eta)] \end{cases}。 \quad (7)$$

对于式(5)不考虑其最后一项固定相位,则其方位向频谱为

$$S_{r2}(t, f_\eta) = \text{FFT}[s_{r2}(t, \eta)] = G_1(t, f_\eta) * G_2(f_\eta) * S_3(f_\eta)。 \quad (8)$$

式(8)中, $S_3(f_\eta) = \text{sinc}\{T_a[f_\eta - \gamma_a \Delta\eta]\}$,当不存在重频抖动时目标方位向聚焦于 $f_\eta = \gamma_a \Delta\eta$ 位置;当存在重频抖动时,由于在包络和相位上均受到调制,此时目标方位向取决于幅度调制函数 $g_1(t, \eta)$ 和相位调制函数 $g_2(\eta)$ 。

2.2 重频抖动造成的时间同步误差影响极限值分析

将式(6)中幅度调制函数重写如下:

$$g_1(t, \eta) = \text{sinc}\{B[t - \delta(\eta) - 2R_0/c]\}。 \quad (9)$$

对于该 sinc 型函数,幅度调制函数的起伏小于 0.1 dB 时,对时间同步误差的要求为

$$\delta(\eta) < \frac{1}{8B}。 \quad (10)$$

对于 SAR 系统,线性调频信号带宽一般为 10^8 量级,因此只有当时间同步误差为 10^{-9} 即纳秒量级时,其造成的幅度调制影响可忽略。

对于相位调制函数,当 $f_c \delta(\eta)$ 为整数时,该相位项无影响,而 $f_c \delta(\eta) < 1$ 时,其相位差小于 $\pi/8$ 时误差影响才可忽略,对应的时间同步误差要求为

$$\delta(\eta) < \frac{1}{16f_c}。 \quad (11)$$

由于毫米波频段载频 f_c 为 10^{11} 量级,因此对于毫米波频段, $\delta(\eta)$ 需满足 10^{-12} 量级,其造成相位误差才对成像没有影响。

2.3 重频抖动误差补偿

从上一部分的分析可知,当已知载波频率和重频抖动时,只需完成对式(6)中的幅度调制 $g_1(t,\eta)$ 和相位调制 $g_2(\eta)$ 补偿即可消除重频抖动的影响。

由于式(5)中的最后一项为固定相位项,不影响图像的聚焦,为简化分析,在以下讨论中不作考虑。

对式(5)作距离向傅里叶变换,得到

$$S_{r2}(f_r,\eta)=\text{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right)\exp[-j2\pi f_r\delta(\eta)]\exp\left[-\frac{4\pi f_rR_0}{c}\right]\exp[-j2\pi f_c\delta(\eta)]\exp[-j2\pi\gamma_a\Delta\eta\cdot\eta]。$$

(12)

式中,第一项为距离频域窗函数;第二项为需进行补偿的幅度调制因子;第三项为目标斜距对应的相位因子;第四项和第五项为与距离向无关的相位因子,分别为重频抖动误差和方位向位置对应的相位因子。可见,第二项和第四项为所需补偿掉的相位项。

在距离向频域完成幅度调制函数的补偿,补偿因子为

$$h_1(f_r,\eta)=\exp[j2\pi f_r\delta(\eta)]。$$

(13)

在距离频域乘该补偿因子,并距离向逆傅里叶变换到时域,得到

$$s_{r3}(t,\eta)=\text{IFFT}[S_{r2}(f_r,\eta)\cdot h_1(f_r,\eta)]=\text{sinc}\left\{B\left[t-\frac{2R_0}{c}\right]\right\}\exp[-j2\pi f_c\delta(\eta)]\exp[-j2\pi\gamma_a\Delta\eta\cdot\eta]。$$

(14)

上式为完成重频抖动造成的幅度调制误差补偿后的函数。

在方位向时域完成相位调制函数 $g_2(\eta)$ 的补偿,即对式(14)乘 $g_2(\eta)$ 的共轭,得到

$$s_{r4}(t,\eta)=s_{r3}(t,\eta)\cdot g_2^*(\eta)=\text{sinc}\left\{B\left[t-\frac{2R_0}{c}\right]\right\}\exp[-j2\pi\gamma_a\Delta\eta\cdot\eta],$$

(15)

再进行方位向傅里叶变换得到补偿后聚焦的点目标表达式如下:

$$S_{r2}(t,f_\eta)=\text{sinc}\left\{B\left[t-\frac{2R_0}{c}\right]\right\}\text{sinc}\{T_a[f_\eta-\gamma_a\Delta\eta]\}。$$

(16)

从上式可知,在斜距多普勒平面上 $t=2R_0/c$ $f_\eta=\gamma_a(R_0)\Delta\eta$ 处可得到成像聚焦后的点目标峰值。

3 仿真分析和实测数据验证

3.1 仿真分析

作为对上述理论的验证,在此结合实际的应用指标,进行仿真分析。

仿真参数设置如表 1 所示。

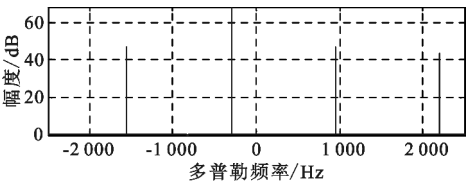
表 1 仿真参数表 Table 1 Simulation parameters	
参数名	参数值
带宽/MHz	100
时宽/ μs	20
重频/Hz	5000

取重频抖动造成时间同步误差满足式(10)和式(11)的情况,如下式所示:

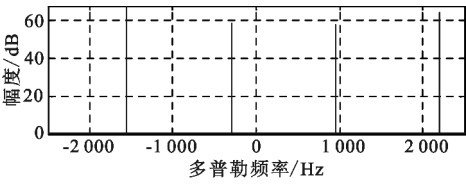
$$\delta(\eta)=\text{mod}(m,4)\cdot1.5\cdot10^{-9},m=0,1,2,3,\cdots。$$

(17)

由该延迟误差造成的幅度调制信号和相位调制信号频谱以及调制后的目标信号频谱如图 1 所示。



(a) 幅度调制后信号频谱



(b) 相位调制后信号频谱

图 1 时延误差造成的幅度和相位调制函数调制的信号频谱
Fig.1 The frequency domain amplitude about amplitude modulation function,phase modulation function and signal of SAR system with PRF jitter error

从图 1 中可知,由于受到重频抖动时间同步误差影响,信号幅度降低,且出现多个重影。其中,幅度调制函数形成的重影幅度小于信号,而相位调制函数形成的重影幅度可能大于信号本身。

图 2 和图 3 分别为存在重频抖动时间同步误差时幅度调制和相位调制的信号幅度和补偿后的信号幅度之比,体现了重频抖动对信号幅度造成的衰减程度。

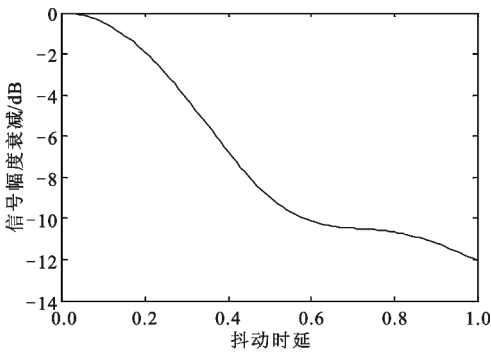


图2 幅度调制函数造成的信号幅度衰减
Fig.2 The attenuation by amplitude modulation function of PRF jitter error

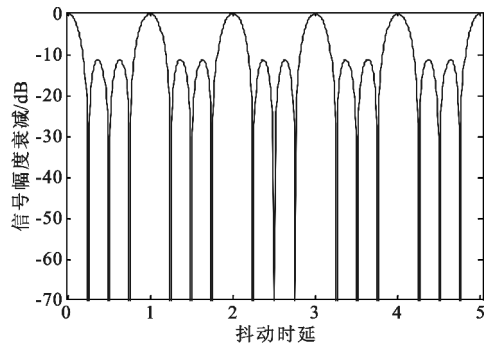


图3 相位调制函数造成的信号幅度衰减
Fig.3 The attenuation by phase modulation function of PRF jitter error

从图2中可以看到,幅度调制函数造成的信号衰减随误差时延的增加线性增加,因此当幅度调制函数小于一定范围时其影响可以忽略,与式(10)分析一致。从图3中看到,相位调制函数对幅度的影响具有周期性,与2.2节的理论分析一致,即当 $f_c\delta(\eta)$ 为整数时,该相位项无影响;而不为整数时,需满足式(11)的要求才不影响信号聚焦。

3.2 实际系统中的重频抖动现象和实测数据处理

某系统由于发射信号与接收信号设备间时钟未能完全同步,出现了如图4所示的重频抖动现象。图4中黄色的为发射触发信号,蓝色的信号为接收触发信号。

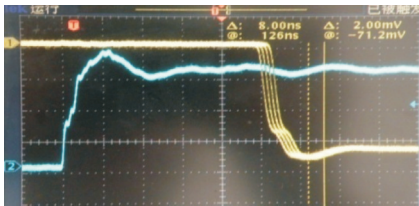


图4 推移主触发相对发射信号存在的抖动
Fig.4 The experimental figure of PRF jitter error

系统中出现在一个PRT周期内,发射脉冲相对

于正确的发射时刻存在一固定的延时,且延时量以0 ns、2 ns、4 ns和6 ns的规律周期变化,即系统的重频抖动延时函数如式(17)所示。根据式(11)和式(12)的分析可知,该重频抖动延迟造成的幅度调制和相位调制影响均不可忽略。

该SAR系统接收的回波数据经距离向脉冲压缩后图像如图5所示。

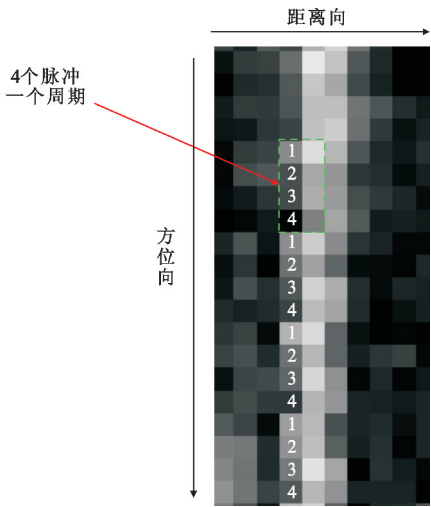


图5 脉冲压缩后的图像
Fig.5 Range compression results

从图5中可以看到,脉冲间产生了周期性的延迟抖动。如不进行补偿,直接进行方位向处理得到的SAR图像如图6所示。

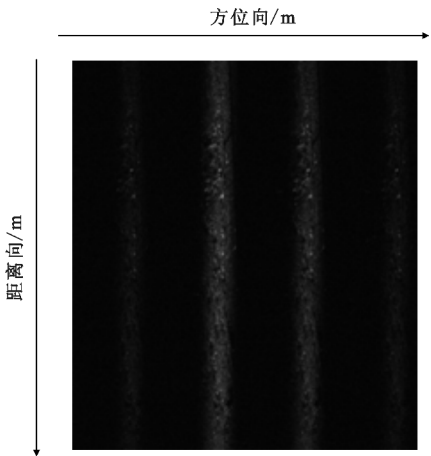


图6 重频抖动 SAR 图像
Fig.6 The SAR imaging with PRF jitter error

正如式(8)分析一样,当出现重频抖动时,方位向聚焦处理相当于SAR图像与延迟调幅信号在频域进行卷积,因此出现4个强弱不同的重影。

从图6可见,重频抖动对SAR雷达系统将带来

严重的影响,必须从设计上或者在处理时进行消除。

图 7 所示为进行重频抖动补偿后处理得到的斜距图像,可见消除了重影的影响。

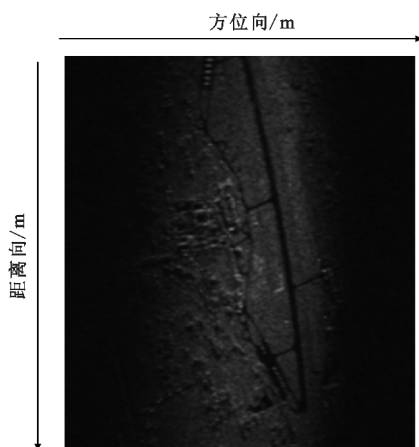


图 7 补偿重频抖动影响后的图像

Fig. 7 The result of PRF jitter compensation

4 结束语

SAR 系统是严格的相干系统,其时统设计同步要求非常高。当脉冲重复频率在成像过程中存在抖动时,SAR 方位图像域表现为理想方位图像与幅度调制信号和相位调制信号频谱的卷积。本文推导了重频抖动误差的补偿理论,通过对实际系统采集得到的数据进行处理,验证了当抖动造成的时间同步误差小于 8 倍带宽分之一的时,幅度调制的影响可以忽略。而相位调制具有周期性的规律,如能利用其规律性选择合适的频点可以消除相位调制对聚焦的影响,否则时间同步误差需小于 16 倍载频频率分之一的时。

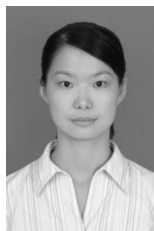
参考文献:

- [1] Curlander J C, Mcdonough R N. 合成孔径雷达—系统与信号处理[M]. 韩传钊,译. 北京:电子工业出版社,2006: 176-182.
Curlander J C, Mcdonough R N. Synthetic Aperture Radar Data: Systems and Signal Processing [M]. Translated by HAN Chuanshao. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 176-182. (in Chinese)
- [2] 高俊峰,李早社,吕磊,等. 合成孔径雷达定时器的 FPGA 实现[J]. 现代雷达,2006,28(11): 33-35.
GAO Junfeng, LI Zaoshe, LYU Lei, et al. FPGA Implementation of Timer for Synthetic Aperture Radar [J]. Modern Radar, 2006, 28(11): 33-35. (in Chinese)
- [3] 杨勇,李亚超,常军,等. 弹载大前斜 SAR 的运动误差模型及精度分析[J]. 电讯技术,2010,50(1): 26-30.

YANG Yong, LI Yachao, CHANG Jun, et al. Modeling and Precision Analysis of Highly Squinted-looking Missile-borne SAR [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(1): 26-30. (in Chinese)

- [4] 闫飞飞,常文革,张启雷. 双站 SAR 时频同步技术[J]. 信号处理,2013,29(3): 386-393.
YAN Feifei, CHANG Wenge, ZHANG Qilei. Time and Frequency Synchronization Technique in Bistatic SAR [J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(3): 386-393. (in Chinese)
- [5] Weib M. Time and Frequency Synchronisation Aspects for Bistatic SAR Systems [C]//Proceedings of 2004 5th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Ulm, Germany: IEEE, 2004: 395-398.
- [6] Weib M. Synchronisation of Bistatic Radar Systems [C]//Proceedings 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Alaska, USA: IEEE, 2004: 1750-1753.
- [7] 张方辉,梁兴东,周良将. 双站 SAR 时间同步误差建模及分析[J]. 国外电子测量技术,2010,29(8): 36-40.
ZHANG Fanghui, LIANG Xingdong, ZHOU Liangjiang. Modeling and analyzing of time synchronization errors in bistatic SAR [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2010, 29(8): 36-40. (in Chinese)
- [8] 何志华,何峰,张永胜,等. 分布式 SAR 时间同步误差的影响分析与试验验证[J]. 宇航学报,2011,32(6): 1373-1378.
HE Zhihua, HE Feng, ZHANG Yongsheng, et al. Effect Analysis of Time Synchronization Error of Distributed SAR and Experiment Validation [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(6): 1373-1378. (in Chinese)

作者简介:



陈娟(1984—),女,湖北石首人,2008 年于电子科技大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为雷达信号处理;

CHEN Juan was born in Shishou, Hubei Province, in 1984. She received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2008. She is now an engineer. Her research concerns radar signal processing.

Email: chj_1030@163.com

常军(1971—),男,四川宜宾人,研究员,主要从事雷达制导系统总体技术研究;

CHANG Jun was born in Yibin, Sichuan Province, in 1971. He is now a senior engineer of professor. His research concerns radar guidance system.

王礼麒(1976—),男,贵州人,高级工程师,主要从事雷达制导系统总体技术研究。

WANG Liqi was born in Guizhou Province, in 1976. He is now a senior engineer. His research concerns radar guidance system.